

Potencial de l'electropolvorització en la indústria alimentària

BERNAT PEREZ-PLAYÀ



Centre d'Innovació, Recerca i Transferència en Tecnologia dels Aliments (CIRTTA), Departament de Ciència Animal i dels Aliments, Facultat de Veterinària, Universitat Autònoma de Barcelona.

ANNA ZAMORA



Centre d'Innovació, Recerca i Transferència en Tecnologia dels Aliments (CIRTTA), Departament de Ciència Animal i dels Aliments, Facultat de Veterinària, Universitat Autònoma de Barcelona.

LLIBERTAT ABAD



Institut de Microelectrònica de Barcelona (IMB-CNM-CSIC).

MANUEL CASTILLO



Centre d'Innovació, Recerca i Transferència en Tecnologia dels Aliments (CIRTTA), Departament de Ciència Animal i dels Aliments, Facultat de Veterinària, Universitat Autònoma de Barcelona.

1. INTRODUCCIÓ

El fenomen de l'atomització electrohidrodinàmica (EHDA: *electro-* fa referència a l'energia elèctrica; *hidro-* dinàmica, a la dinàmica dels fluids, i *atomització*, a la conversió d'un líquid en gotes fines) és una tecnologia que permet transformar un líquid en gotes fines (electropolvorització) o fibres (electrofilatura) utilitzant un camp elèctric intens a temperatura ambient. El procés EHDA evita el dany tèrmic, és senzill, econòmic, flexible, i pot produir fibres o partícules a escala micro-, sub- i nanomètrica. L'ús de camps elèctrics modifica la microestructura dels productes obtinguts, canviant-ne les propietats funcionals (Bhushani i Anandharamakrishnan, 2014; Xie *et al.*, 2014).

L'electropolvorització és una tècnica que permet generar gotes molt fines i de mida monodispersada a partir d'un líquid sotmès a un camp elèctric (Barrero i Loscertales, 2007). L'energia d'un camp elèctric intens, de l'ordre dels $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$, es fa servir per aconseguir la separació de microgotes. Diversos paràmetres influeixen en aquest procés, com ara les propietats de la solució (tensió superficial, viscositat i conductivitat elèctrica), així com les condicions operatives (voltatge aplicat i distància agulla-col·lector, que determina l'estructura del camp elèctric). També cal considerar les condicions ambientals, com la temperatura de la cambra i el flux d'aire, que poden influir en el rendiment del procés (Bohr *et al.*, 2013; Monar i Redrován, 2017).

Aquesta tecnologia és objecte d'un ampli estudi en diversos camps, com ara l'enginyeria de teixits i la medicina regenerativa, els sensors nanoestructurats, la indústria tèxtil, la ciència dels materials i la química (Landa, 2017). Tot i això, la utilització d'aquesta tecnologia en el context del processament d'aliments continua essent poc explorada. Les aplicacions potencials dins d'aquest camp d'estudi inclouen l'encapsulació, la immobilització d'enzims, el recobriment d'aliments i el desenvolupament de materials per a la filtració i l'envasament actiu (Bhushani i Anandharamakrishnan, 2014). Un estudi en matrius alimentàries dut a terme per Luo *et al.* (2011) va demostrar que la tècnica d'electrofilatura es pot emprar per modificar la textura i la sensació en boca de les fibres de xocolata. D'altra banda, Perez-Playà (2022) va aplicar la tecnologia d'electropolvorització per concentrar llet desnatada, i va aconseguir eliminar el 50% de l'aigua sense afectar les caseïnes ni les proteïnes sèriques.

2. MECANISME D'ACCIÓ

Un sistema bàsic EHDA consta de quatre components principals: una bomba de xeringa, una xeringa, una agulla metàl·lica, una font d'alta tensió i un col·lector connectat a terra. Quan la solució és impulsada a través de l'agulla sota un camp elèctric elevat, es forma el conegut **con de Taylor** a la seva punta. Aquesta estructura és el resultat de l'equilibri entre la tensió superficial del lí-

quid i les forces generades pel camp elèctric (Zhou i Biswas, 2020).

Els ions presents en el líquid són accelerats cap a l'apex del con a causa del camp elèctric, i això genera que un jet prim s'ejecta des de la punta del con. Aquest jet roman estable fins que les inestabilitats superficials en provoquen la fragmentació en gotes carregades elèctricament (Cloupeau i Prunet-Foch, 1989; Hartman *et al.*, 1999).

Un cop formades les gotes carregades, aquestes experimenten un procés de contracció a causa de l'evaporació del dissolvent. Durant aquest procés, la càrrega elèctrica neta de cada gota es manté constant, de manera que la seva concentració de càrrega augmenta a mesura que la mida de la gota disminueix (Bohr *et al.*, 2013). Quan aquesta concentració elèctrica arriba al límit de Rayleigh, es produeix el fenomen de fissió de Coulomb, en què l'equilibri entre la tensió superficial i les forces elèctriques es trenca, cosa que provoca la fragmentació de la gota en gotes més petites i una vaporització parcial del dissolvent (Zhou i Biswas, 2020).

La formació de partícules es pot donar per dues vies diferents. El solut present dins les gotes es concentra progressivament, cosa que dona lloc a una precipitació sobre la superfície de la gota. Això condueix a la formació d'una closca sòlida, mentre el dissolvent restant s'evapora des de l'interior fins que la partícula queda completament seca (Xue *et al.*, 2010). D'altra banda, si es produeix una sobresaturació homogènia dins de tota la gota, el solut precipita de manera uniforme i forma partícules sòlides (Zhou i Biswas, 2020). La interacció entre la velocitat d'evaporació i la difusió de molècules a l'interior de la gota influeix de manera significativa en les característiques finals de les partícules (Gomez i Deng, 2011).

3. CANVIS EN LES PROPIETATS FISCOQUÍMIQUES

Ergin (2022) va dur a terme un estudi en què comparava tres mètodes de deshidratació: l'assecatge per atomització, la liofilització i l'electropolvorització per a la producció de partícules en pols del bacteriòfag Felix O1. L'estudi va revelar que les partícules obtingudes per liofilització presentaven una estructura porosa, formes irregulars i fractures superficials. En canvi, les partícules obtingudes per assecatge per atomització mostraven superfícies enfonsades, mides heterogènies i la presència de partícules petites incrustades dins de partícules més grans, a causa de les altes temperatures i l'evaporació ràpida del dissolvent. Per contra, les partícules generades mitjançant electropolvorització eren més petites, de forma més esfèrica i amb superfícies lliures. Aquestes característiques s'atribueixen a l'ús de fluxos molt baixos i als processos de fissió de Coulomb, que generen un núvol de gotes molt petites i homogènies.

En la llet desnatada, es pot observar un comportament similar quant a mida de partícula. Pel que fa la morfologia, el procés de liofilització presenta el mateix tipus d'estructura que en l'estudi anterior (vegeu la figura 1a). Per una altra banda, les partícules obtingudes per assecatge per atomització presenten una superfície lliura (vegeu la figura 1b), mentre que les partícules electropolvoritzades tenen la superfície enfonsada, ja que l'elevada tensió superficial de l'aigua provoca una deformació estructural degut a un augment de la força de compressió durant l'eliminació de solvent (vegeu la figura 1c) (Gao *et al.*, 2015).

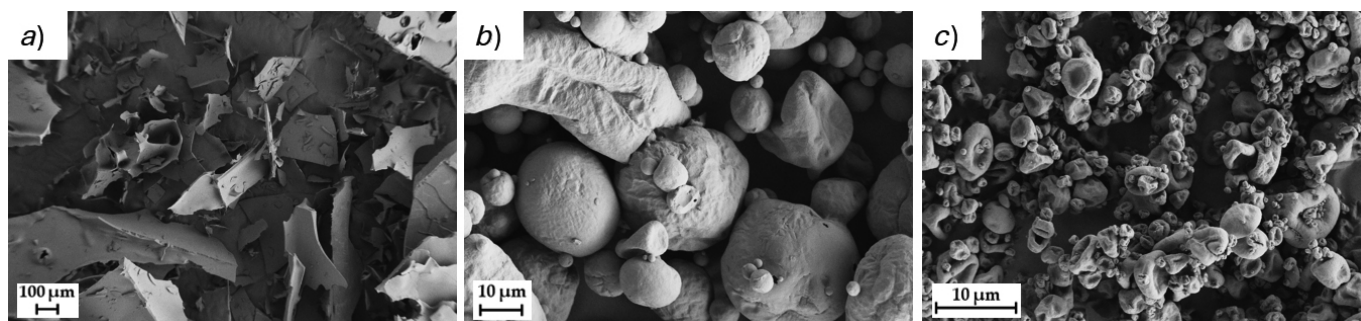


Figura 1. Microscòpia electrònica d'escaneig de partícules de llet en pols desnatada. a) Liofilització. b) Assecatge per atomització. c) Electropolvorització.

Font: Elaboració pròpia.

En el mateix estudi, Ergin (2022) va analitzar la mullabilitat i la solubilitat de les pols del bacteriòfag Felix O1 obtingudes pels tres mètodes. Pel que fa a la mullabilitat, els valors més alts es van observar a la pols obtinguda per electropolvorització, possiblement degut a la seva alta densitat i mida de partícula petita. En referència a la solubilitat, el procés de liofilització va aconseguir millors resultats, atribuïbles a l'estructura porosa. Pel que fa la densitat aparent i la densitat compactada de les pols obtingudes per liofilització i per assecatge per atomització, no es van detectar diferències significatives, en comparació amb les pols produïdes mitjançant electropolvorització, que van mostrar valors més elevats.

A l'estudi de Jayaprakash *et al.* (2023), es va mesurar el temps de reconstitució de les micropartícules mitjançant conductivitat dinàmica. Es va observar que les micropartícules obtingudes per liofilització es rehidrataven més ràpidament que les obtingudes pels altres dos mètodes, gràcies a la seva estructura altament porosa. Les micropartícules produïdes per electropolvorització es rehidrataven més ràpidament que les obtingudes per assecatge per atomització en totes les matrius analitzades. No obstant això, el potencial elèctric aplicat també va influir significativament en el temps de rehidratació segons el tipus de matriu. Per exemple, en el cas de maltodextrina, les micropartícules generades amb un voltatge de 12 kV es rehidrataven més ràpidament que les de 3 kV, mentre que, per a la llet desnatada i la goma aràbiga, el temps de rehidratació s'allargava amb 12 kV.

Finalment, a l'estudi de Ying *et al.* (2023), es van analitzar mostres de nanocristalls de cel·lulosa obtingudes per electropolvorització, liofilització i assecatge per atomització mitjançant anàlisi de calorimetria diferencial d'escaneig. Les mostres obtingudes per electropolvorització van presentar una major estabilitat tèrmica, atribuïble a la presència de cristalls més grans i més alineats, que conferien una estabilitat tèrmica superior.

«L'electropolvorització es presenta com una tecnologia amb un gran potencial per a l'obtenció de partícules amb característiques molt controlades.»

4. CONCLUSIÓ

L'electropolvorització es presenta com una tecnologia amb un gran potencial per a l'obtenció de partícules amb característiques molt controlades. A diferència de la liofilització i l'assecatge per atomització, aquesta tècnica permet generar partícules més petites, uniformes i amb superfícies llises, gràcies a l'acció del camp elèctric i als processos de fissió de Coulomb. Això es tradueix en canvis a les propietats fisicoquímiques, que poden resultar molt útils en aplicacions alimentàries. Tot i que encara es tracta d'una eina poc explotada en aquest sector, els resultats obtinguts fins ara suggereixen que pot esdevenir una alternativa eficient i versàtil per al desenvolupament de nous ingredients per al sector alimentari.

5. AGRAÏMENTS

Aquesta recerca ha utilitzat la xarxa espanyola ICTS Network MICRO-NANOFABS, parcialment finançada per fons FEDER a través del projecte MINATEC-PLUS-2 projecte E FICTS2019-02-40. Els autors també agraeixen la certificació María de Maeztu: CEX2023-001397-M / AEI/10.13039/501100011033 i Generalitat de Catalunya 2021 SGR 00497.

REFERÈNCIES

- BARRERO, A.; LOSCERTALES, I. G. (2007). «Micro- and nanoparticles via capillary flows». *Annual Review of Fluid Mechanics* [en línia], 39 (1), p. 89-106. <<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.fluid.39.050905.110245>>.
- BHUSHANI, A. J.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. (2014). «Electrospinning and electrospaying techniques: Potential food based applications». *Trends in Food Science and Technology* [en línia], 38 (1), p. 21-33. <<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.03.004>>.
- BOHR, A.; BOETKER, J. P.; RADES, T.; YANG, M. (2013). «Application of spray-drying and electrospaying/electrospinning for poorly water-soluble drugs: A particle engineering approach». *Current Pharmaceutical Design* [en línia], 20 (3), p. 325-348. <<http://dx.doi.org/10.2174/13816128113199990399>>.
- CLOUPEAU, M.; PRUNET-FOCH, B. (1989). «Electrostatic spraying of liquids in cone-jet mode». *Journal of Electrostatics* [en línia], 22 (2), p. 135-159. <[https://doi.org/10.1016/0304-3886\(89\)90081-8](https://doi.org/10.1016/0304-3886(89)90081-8)>.
- ERGIN, F. (2022). «Effect of freeze drying, spray drying and electrospaying on the morphological, thermal, and structural properties of powders containing phage Felix O1 and activity of phage Felix O1 during storage». *Powder Technology* [en línia], 404, 117516. <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117516>>.
- GAO, Y.; ZHAO, D.; CHANG, M.-W.; AHMAD, Z.; LI, X.; SUO, H.; LI, J.-S. (2015). «Morphology control of electrospayed core-shell particles via collection media variation». *Materials Letters* [en línia], 146, p. 59-64. <<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.02.013>>.
- GOMEZ, A.; DENG, W. (2011). «Fundamentals of cone-jet electrospay». A: KULKARNI, P.; BARON, P. A.; WILLEKE, K. *Aerosol measurement: Principles, techniques, and applications*. 3a ed. Nova York: Wiley, p. 435-448.
- HAN, T.; RENEKER, D. H.; YARIN, A. L. (2007). «Buckling of jets in electrospinning». *Polymer* [en línia], 48 (20), p. 6064-6076. <<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.08.002>>.

- HARTMAN, R. P. A.; BRUNNER, D. J.; CAMELOT, D. M. A.; MARIJNISSEN, J. C. M.; SCARLETT, B. (1999). «Electrohydrodynamic atomization in the cone-jet mode physical modeling of the liquid cone and jet». *Journal of Aerosol Science* [en línia], 30 (7), p. 823-849. <[https://doi.org/10.1016/s0021-8502\(99\)00033-6](https://doi.org/10.1016/s0021-8502(99)00033-6)>.
- JAYAPRAKASH, P.; GAIANI, C.; EDORH, J. M.; BORGES, F.; BEAUPEUX, E.; MAUDHUIT, A.; DESOBRY, S. (2023). «Comparison of electrostatic spray drying, spray drying, and freeze drying for *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG dehydration». *Foods* [en línia], 12 (16), 3117. <<https://doi.org/10.3390/foods12163117>>.
- LANDA, G. (2017). *Desarrollo de andamios fibrosos de policaprolactona, condroitín sulfato y ácido hialurónico para regeneración de cartílago* [en línia]. Tesi de màster. Universidad de Zaragoza. <<https://zaguan.unizar.es/record/76326?ln=es>> [Consulta: 14 abril 2025].
- LUO, C.; LOH, S.; STRIDE, E. (2011). «Electrospraying and electrospinning of chocolate suspensions». *Food and Bioprocess Technology* [en línia], 5 (6), p. 2285-2300. <<http://dx.doi.org/10.1007/s11947-011-0534-6>>.
- MONAR, D.; REDROVÁN, P. (2017). *Obtención de micropartículas de polivinilpirrolidona (PVP) a través de la técnica de electro spray* [en línia]. Projecte final de carrera. Universidad de las Fuerzas Armadas. Red de Investigadores Ecuatorianos. <<https://redi.cedia.edu.ec/document/370728>> [Consulta: 14 abril 2025].
- PEREZ-PLAYÀ, B. (2022). *Milk solid deposition induced by an electric field: A preliminary study* [en línia]. Tesi de màster. Universitat Autònoma de Barcelona. <<https://ddd.uab.cat/record/259050>> [Consulta: 14 abril 2025].
- XIE, J.; JIANG, J.; DAVOODI, P.; SRINIVASAN, M. P.; WANG, C.-H. (2014). «Electrohydrodynamic atomization: A two-decade effort to produce and process micro-/nanoparticulate materials». *Chemical Engineering Science* [en línia], 125, p. 32-57. <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.08.061>>.
- XUE, L.; MAO, L.; CAI, Q.; YANG, X.; JIN, R. (2010). «Preparation of amino acid ester substituted polyphosphazene microparticles via electrohydrodynamic atomization». *Polymers for Advanced Technologies* [en línia], 22 (12), p. 2009-2016. <<https://doi.org/10.1002/pat.1711>>.
- YING, L.; WOON, R.P.; YI, X.; YAU, S.F. (2023). «Electrospray drying-mediated coating of cellulose nanocrystal». *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* [en línia], 6, 100345. <<https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100345>>.
- ZHOU, H.; BISWAS, P. (2020). «The prediction of size and charge of particles formed from evaporation of charged droplets generated in an electrospray system». *Chemical Engineering Science* [en línia], 116237. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2020.116237>>.